УДК 621.314:658.512

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СРЕДЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАРС

Т.Н. Зайченко

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: sc@fet.tusur.ru

Рассматриваются вопросы применения отечественной универсальной среды автоматизированного моделирования МАРС для решения задач динамики электромеханических систем. Приведены формализованное представление электрической и механической частей электромеханической системы, примеры структурного и схемотехнического моделирования.

Введение и постановка задачи

На кафедре теоретических основ электротехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники ведутся работы по созданию комплекса программ автоматизации функционального проектирования электротехнических устройств и систем [1]. Их основой являются:

- метод компонентных цепей (КЦ) Е.А. Арайса и В.М. Дмитриева [2] как теоретическая база автоматизации моделирования неоднородных технических устройств;
- универсальная среда автоматизированного моделирования МАРС (Моделирование и Автоматический Расчет Систем) для Windows [3], являющаяся программной реализацией теоретических основ.

В общем случае математическая модель КЦ состоит из трех типов уравнений относительно переменных связей КЦ: топологических (для потоковых переменных), компонентных и базового узла (для потенциальной переменной; присутствует только в моделях КЦ с энергетическими связями) [1, 2]. В свою очередь среда (система) МАРС включает две части: инвариантную – методы формирования и решения модели КЦ и объектно-ориентированную – библиотеки моделей компонентов соответствующей предметной области. Таким образом, среда МАРС позволяет реализовать моделирование электромеханических систем (ЭМС) при наличии в ее составе моделей элементов и функциональных узлов ЭМС.

Решение задач динамики в системе МАРС рассматривалось в работах Е.А. Арайса, В.М. Дмитриева, А.В. Шутенкова, Л.А. Арайс [2, 4, 5], но применительно к механическим системам. В них использовались модели электроприводов на уровне идеализированных моделей: источников скорости и силы (момента) либо постоянной величины, либо изменяющейся во времени по определенному закону (трапецеидальному, синусоидальному). Такой подход неприменим для решения задач динамики ЭМС, где закон изменения момента и скорости электрической машины (ЭМ) заранее неизвестен, а его определение является одной из целей моделирования.

Целью настоящей работы является развитие объектно-ориентированной составляющей (библиотеки моделей компонентов) системы МАРС для решения задач динамики ЭМС. Разработка модели компонента включает выбор математических моделей функционального и визуального аспектов элемента ЭМС и их программную реализацию в системе МАРС (язык Microsoft Visual C++, среда разработки Visual Studio.NET). При этом математическая модель функционального аспекта отражает процесс функционирования элемента, а модель визуального аспекта – модель условного графического обозначения (УГО) на чертеже КЦ и в дереве раздела библиотеки моделей компонентов среды МАРС.

Структурное моделирование ЭМС

Структурное моделирование ЭМС базируется на математических моделях ЭМ и ЭМС, формализме структурных схем и методах теории автоматического управления. Для структурного моделирования ЭМС необходима реализация моделей элементов структурных схем и математических блоков. Модели компонентов линейных систем автоматического управления (интегрирующее и пропорциональное звенья, сумматор, регуляторы, фильтр) были разработаны и представлены в статье [6]. Для

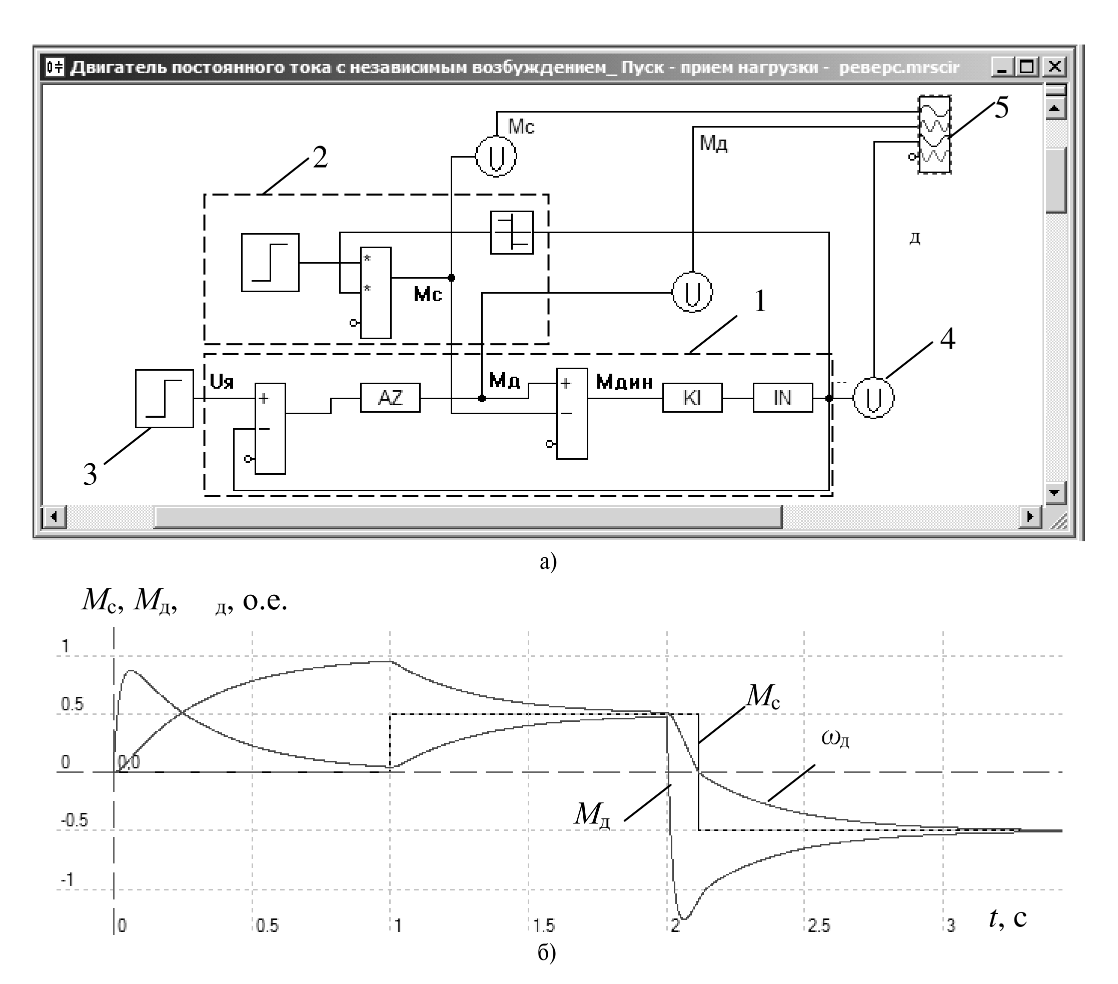


Рис. 1. *КЦ двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (а) и результаты моделирования (б) цикла пуск в ход вхолостую, прием нагрузки, реверс при реактивном моменте типа сухого трения*

решения задач моделирования ЭМС были дополнительно реализованы модели элементов математических блоков и нелинейных элементов систем автоматического управления. При построении моделей учитывались их модели и УГО в системе MATLAB [7].

На рис. 1, *а*, приведен пример моделирования двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Здесь подцепь – 1, состоящая из сумматоров, апериодического *AZ*, интегрирующего *IN* и пропорционального *KI* звеньев, соответствует математической модели двигателя. Подцепь – 2 является моделью реактивного момента типа силы сухого трения. Она строится на базе источника ступенчатого воздействия, компонента «знак числа» и умножителя. Источник ступенчатого воздействия – 3 используется для задания напряжения якоря. Помимо перечисленных компонентов в КЦ включены измерительные приборы – 4 и компонент графического представления результатов – 5. На рис. 1, *б*, представлены результаты моделирования для цикла пуск в ход вхолостую, прием нагрузки, реверс – временные диаграммы момента сопротивления $М_с$, электромагнитного момента $М_Д$ и скорости двигателя $\omega_Д$.

Схемотехническое моделирование ЭМС

Автоматизированное схемотехническое моделирование предполагает использование традиционного языка принципиальных электрических и кинематических схем. Формализованное представление ЭМС для схемотехнического моделирования базируется на формализме КЦ механических систем [2, 4, 5], использующем систему обратных аналогий, когда момент (сила) является потоковой переменной, а скорость – потенциальной. Концептуальная модель ЭМС при схемотехническом моделировании изображена на рис. 2. Здесь компонент электрическая машина – 1 энергетическими связями – 2, на которых действуют переменные связи электрического типа, подключен к КЦ электрической подсистемы (КЦЭ) – 3. Энергетической связью – 4 с переменными механического типа электрическая машина присоединена к КЦ механической подсистемы (КЦМ) – 5 и компоненту механики одномерная масса (эффект инерционности) – 6. Если ЭМ работает в генераторном режиме, то КЦЭ – это электрическая нагрузка, а КЦМ – приводной двигатель. Для двигательного режима КЦЭ – это силовой преобразователь, включая си-

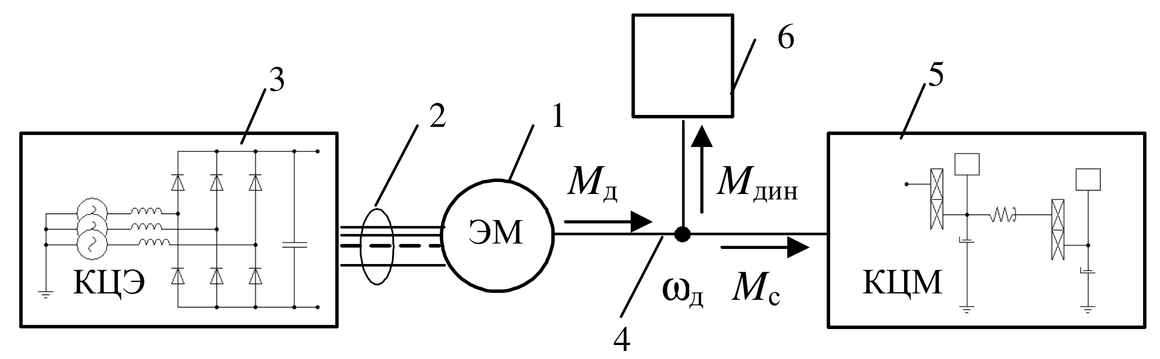


Рис. 2. *Компонентная цепь электромеханической системы при схемотехническом моделировании*

стему управления и источник электропитания, КЦМ – механическая нагрузка.

При принятой концептуальной модели ЭМС модель ЭМ реализует уравнения обобщенного электромеханического преобразователя. Моделью компонента инерционность является уравнение движения относительно динамического момента. Уравнение для динамического момента как алгебраической суммы электромагнитного момента двигателя и момента сопротивления формируется автоматически, будучи узловым топологическим законом для потоковых переменных связей. Вопросы схемотехнического моделирования электромеханических преобразователей в системе МАРС были изложены подробно в работе [8]. Вычислительные модели ЭМ реализованы на основе математических моделей обобщенных электромеханических преобразователей, представленных в работах И.П. Копылова [9] и А.И. Чучалина [10]. УГО компонентов в графическом редакторе системы МАРС в основном соответствуют общепринятым, рис. 3. При выборе способа формализованного представления компонентов ЭМ и их математических моделей учитывалось, что переменные, подлежащие наблюдению в процессе выполнения вычислительного эксперимента, должны быть переменными связей компонента. Для их измерения в КЦ включаются измерительные приборы – измерители потоковых и потенциальных переменных. Компоненты трехфазные асинхронные ЭМ имеют связи энергетического типа, соответствующие началам и концам обмоток ротора и статора, позволяющие варьировать способы соединения обмоток. Реализованы два типа компонентов ЭМ: с линейными математическими моделями и моделями общего вида с возможностью настройки на линейные либо нелинейные режимы. Параметрами всех моделей ЭМ являются активные сопротивления и индуктивности рассеяния обмоток, число пар полюсов. Дополнительный параметр линейных моделей – взаимная индуктивность обмоток.

Настройка компонентов ЭМ с моделями общего вида на линейный либо нелинейный режим осуществляется на этапе построения КЦ. УГО компонентов с моделями ЭМ общего вида имеют две дополнительные информационные связи, рис. 3, потенциальные переменные которых суть модуль намагничивающего тока i_δ и статическая взаимная индуктивность L_c. Функциональную зависимость $L_c=f(i_\delta)$ требуется установить. В общем случае это может быть выполнено при помощи компонентов структурных схем, осуществляющих математические операции и функции. В работе [8] для реализации нелинейного режима построен компонент кривая намагничивания, у которого i_δ и L_c являются переменными связей. Электромагнитная характеристика ЭМ $\Psi=f(i_\delta)$, необходимая для расчета $L_c=\Psi/i_\delta$, как и в работе А.И. Чучалина [10], представлена линейной функцией на ненасыщенном участке и степенной – в области насыщения. Коэффициенты и показатель степени аппроксимирующих функций являются параметрами модели. Для настройки моделей ЭМ на использование в режиме линейных необходимо определить величину взаимной индуктивности L_c=const путем подключения к соответствующей связи компонента ЭМ компонента-источника потенциальной переменной постоянной величины (компонента «константа»).

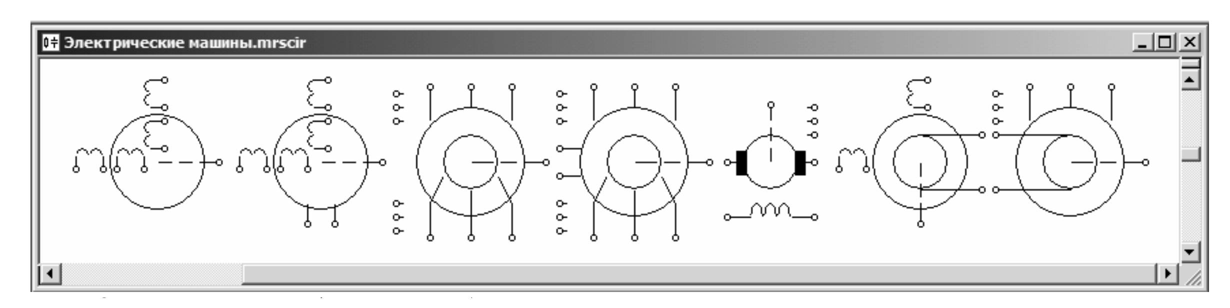


Рис. 3. *Условные графические обозначения компонентов электрических машин в системе МАРС*

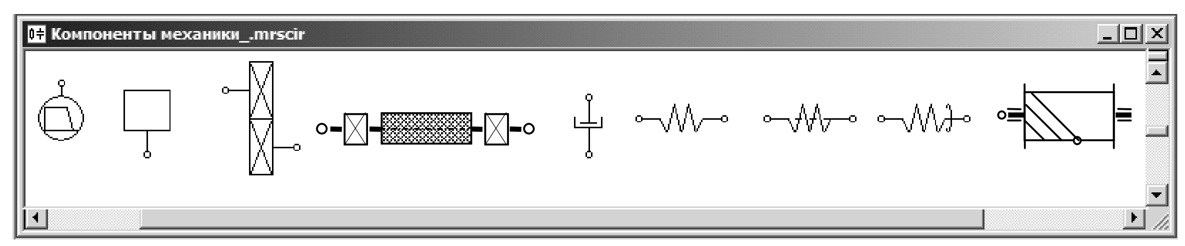


Рис. 4. Условные графические обозначения механических компонентов в системе МАРС

Формализованное представление механической части ЭМС в виде КЦ определяется составом ЭМС, параметрами элементов, постановкой задачи моделирования и может варьироваться от упрощенной расчетной схемы (жесткое приведенное механическое звено) до разветвленных кинематических схем многодвигательных электроприводов. Как указывалось выше, в работах [2, 4, 5] решались задачи формализованного представления и моделирования механических систем и были разработаны базовые модели физических эффектов и элементов одномерной механики – инерционность, передаточное устройство, демпфер (эффект трения), жесткость. В настоящей работе вычислительные модели перечисленных компонентов дополнены моделями визуального аспекта и включены в библиотеку системы МАРС для Windows. Для решения задач динамики строительных и дорожных машин с учетом свойств ЭМС электропривода потребовались и были построены модели компонентов вала и жесткостей, параметрами которых являются линейные размеры элементов, модули сдвига и упругости [11]. Перечисленные компоненты механики имеют две энергетические связи.

Для решения задач динамики электроэнергетических систем с учетом колебаний ротора ЭМ, а также механических систем разработан односвязный компонент – приводной двигатель. Его математическая модель определяет потенциальную переменную (скорость) как непрерывную однозначную кусочно-линейную на двух участках функцию потоковой переменной (момента). Функция задается координатами трех точек: по одной точке на каждом из линейных участков и точкой перегиба, и предназначена для использования в качестве кусочно-линейной аппроксимации механической характеристики двигателя.

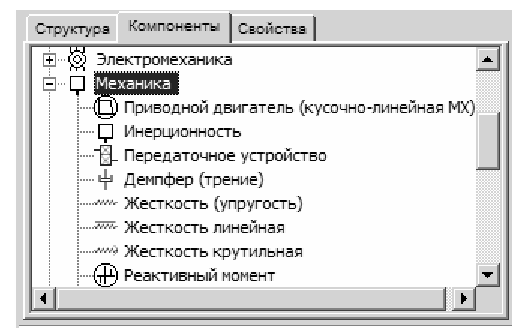


Рис. 5. Раздел компонентов механики

УГО компонентов механики системы МАРС – приводной двигатель, инерционность, передаточное устройство, вал, демпфер (эффект трения), жесткость без указания типа, линейная жесткость, крутильная жесткость, блок канатной передачи изображены на рис. 4. На рис. 5 приведена часть дерева компонентов механики, из которого они выбираются в процессе создания чертежа КЦ в графическом редакторе системы МАРС для Windows [3].

Решение задачи динамики электропривода на основе упрощенных расчетных схем потребовало введения в рассмотрение компонентов статических нагрузок с математическими моделями, соответствующими механическим характеристикам исполнительных механизмов [12]. Моделью компонента является уравнение относительно скорости $\omega_м$ и момента $M_м$ нагрузки $\omega_м=f(M_м)$. Компонент нагрузка имеет две энергетические связи. Один из его узлов принимается за базовый и заземляется.

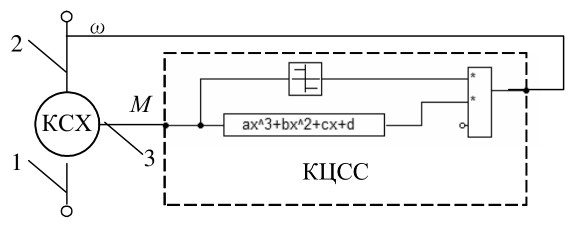


Рис. 6. Концептуальная модель нагрузки и приводного двигателя

Для создания моделей нагрузочных и движущих моментов, отличающихся от типовых, могут применяться метод электрических аналогий и аппарат структурных схем. Концептуальная модель второго подхода представлена на рис. 6. Здесь компонентной цепью структурной схемы (КЦСС) формируется требуемая математическая модель относительно скорости ω и момента M в виде функции $\omega=f(M)$. Компонент статическая характеристика нагрузки (двигателя) (КСХ) помимо двух энергетических связей 1 и 2 имеет дополнительную информационную связь – 3 и осуществляет преобразование потенциальной переменной информационной связи M в потоковые переменные энергетических связей.

Пример схемотехнического моделирования ЭМС электропривода

Рассматривается задача пуска в ход асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором в стартерном режиме. Первичным источником электропитания является аккумуляторная батарея (АБ), силовым преобразователем – трехфазный инвертор напряжения. Компонентная цепь ЭМС представлена на рис. 7.

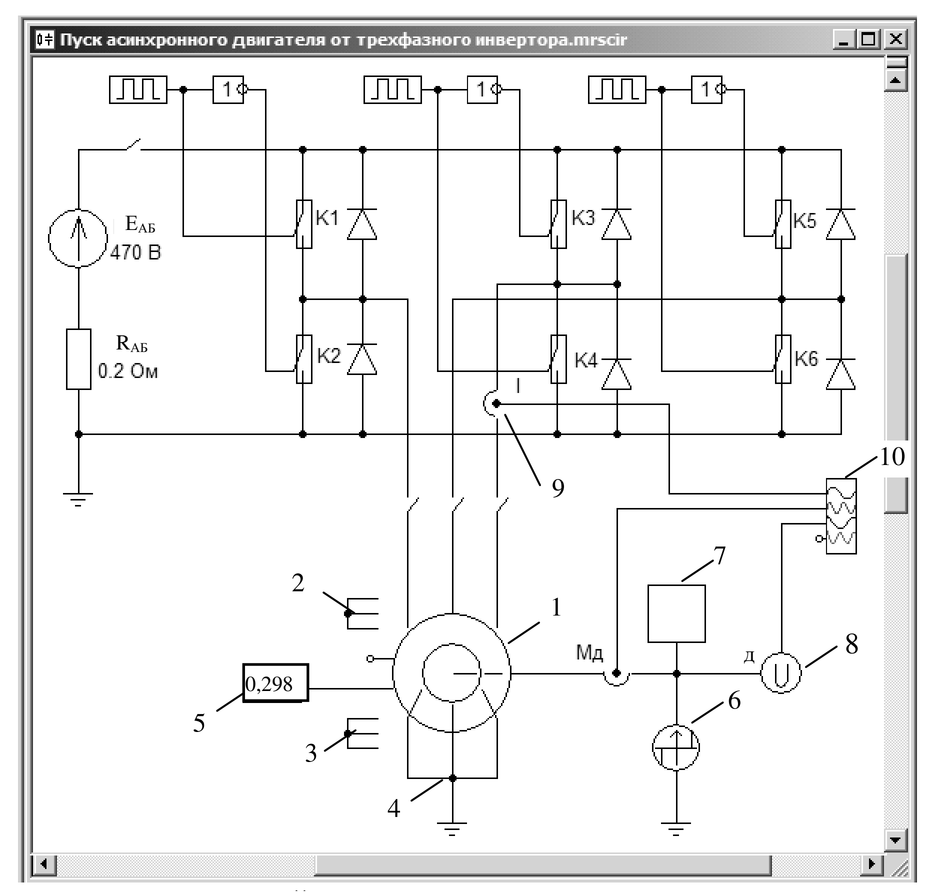


Рис. 7. *КЦ электрокинематической схемы асинхронного электропривода*

Центральной частью КЦ ЭМС является компонент АД – 1 с математической моделью общего вида. Схема соединения обмоток статора – "звезда", концы обмоток статора замкнуты накоротко в узле – 2. Обмотка ротора короткозамкнутая, что достигается объединением выводов роторной обмотки в узлах – 3 и 4. Модель АД общего вида используется в режиме линейной. Для этого связь АД, переменной которой является взаимная индуктивность, подключается к компоненту «константа» – 5, задающему величину индуктивности. Связью с механическими переменными АД присоединен к источнику реактивного момента нагрузки – 6 и компоненту инерционность – 7. Для регистрации скорости в КЦ включен измеритель потенциальной переменной – 8, для измерения тока и момента – датчики тока (потоковой переменной) – 9, использующиеся в режиме приборов регистрирующего типа. Применяется графическая форма представления результатов расчетов. Для этого выходы компонентов-измерителей подключены к входам компонента-графика – 10. Поскольку цепи статора и ротора не связаны электрически, то для формирования невырожденной системы уравнений цепь обмотки ротора должна иметь базовый узел отсчета. Поэтому выбранный в качестве базового узел – 4 цепи ротора заземлен.

Рассматривается асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 4А100S2У3, предназначенный для работы от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, с номинальными данными:

Синхронная частота вращения, об/мин 3000
Мощность, кВт 4
Скольжение, % 4
КПД, % 86,6
Коэффициент мощности .0,89
Момент инерции, г·м^2 23,2
Ток, А 8
Момент, Н·м 13,2
Кратность максимального момента 2,2
пускового момента 2,0
пускового тока 7,5

Моделирование производится в именованных единицах. Модель АД имеет параметры: активные сопротивления обмоток статора 1,458 Ом и ротора 0,99 Ом; индуктивности рассеяния обмоток статора 4,73 мГн и ротора 8,7 мГн, число пар полюсов равно единице. Взаимная индуктивность 0,298 Гн является параметром источника постоянного воздействия – 5 (рис. 7).

В тестовом примере, рис. 7, аккумуляторная батарея АБ представлена источником электродвижущей силы $E_{АБ}$ 470 В и внутренним сопротивлением $R_{АБ}$ 0,2 Ом. Силовая часть трехфазного мостового инвертора напряжения построена на ключах К1–К6.

Модель схемы управления функционального уровня реализована на трех источниках сигнала прямоугольной формы и трех инверторах. Источники сигнала имеют частоту 50 Гц, скважность 2, и их импульсы сдвинуты взаимно на 1/3 периода. Мо-

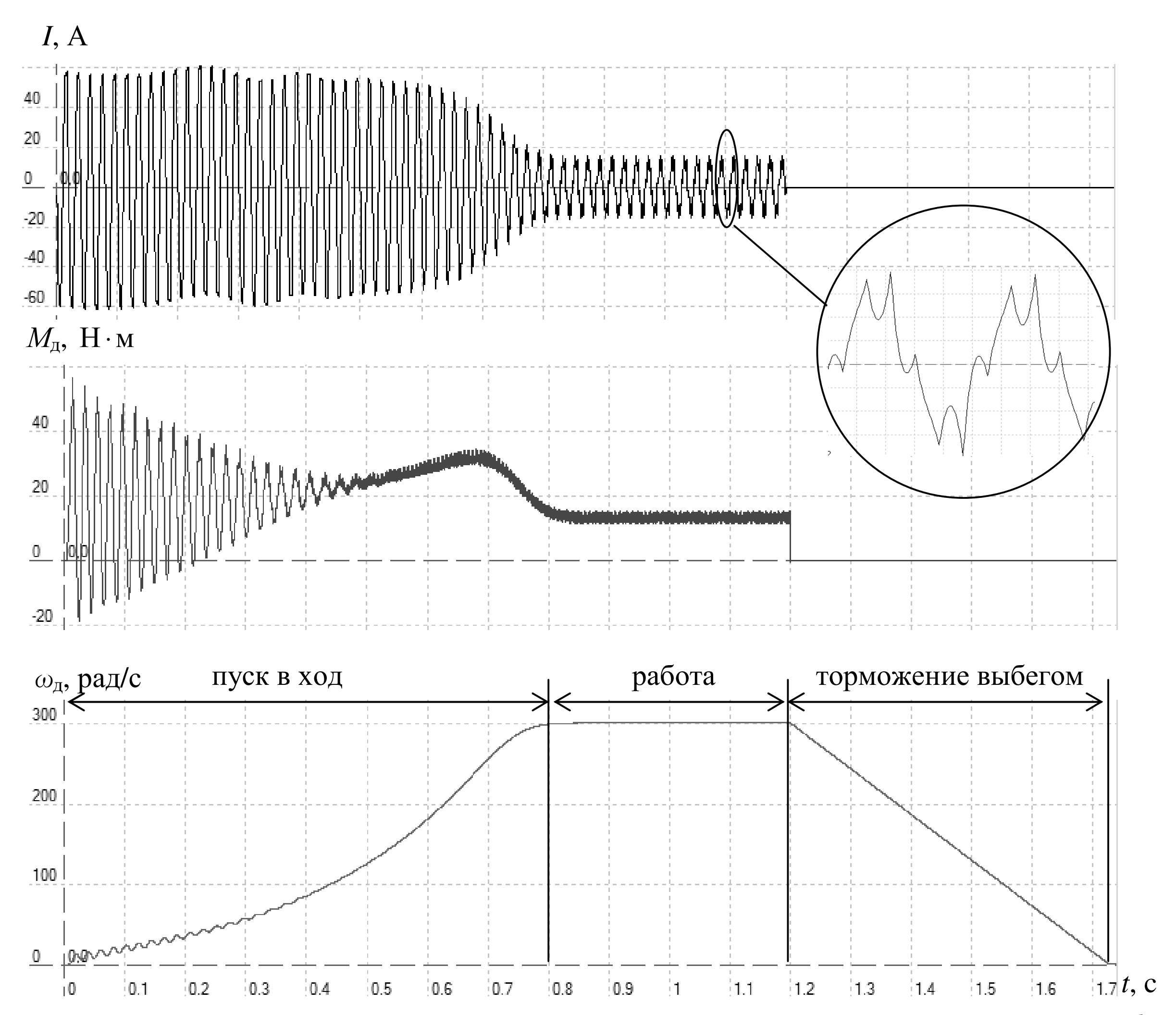


Рис. 8. *Временные диаграммы тока: статора I, электромагнитного момента $M_д$ и скорости $\omega_д$ АД для цикла пуск в ход, работа, торможение выбегом*

дель обеспечивает формирование сигналов управления ключами инвертора: единичного уровня – на замыкание ключа и нулевого – на размыкание.

Параметр компонента инерционность – момент инерции ЭМС. Для тестового примера с целью сокращения времени моделирования суммарный момент инерции принят равным 2,32 г·м^2.

В качестве модели нагрузки используется идеализированная кусочно-линейная модель типа реактивного момента. Варьируя величину момента, можно изменять режим пуска в ход АД (вхолостую, с номинальной нагрузкой и т.п.).

Для анализа электромеханических переходных процессов в ЭМС на базе АД во временной области задаются время анализа, минимальный и максимальный шаги и точность решения. Решение производилось методом Эйлера с автоматическим выбором шага интегрирования. Минимальный и максимальный шаги интегрирования – 0,1 и 5 мс; точность решения – 0,1. На рис. 8 представлены результаты моделирования работы АД при номинальной нагрузке 13,2 Н·м – временные диаграммы тока статора, скорости и момента двигателя.

Заключение

Рассмотрены проблемы моделирования электромеханических переходных процессов в электромеханических системах с использованием среды МАРС. Разработаны компоненты математических блоков, обеспечивающие решение задач динамики с использованием формализма структурных схем; электрических машин и элементов механики для схематического моделирования.

Предложен способ создания моделей приводных двигателей электроэнергетических электромеханических систем и нагрузок электропривода для схемотехнического моделирования с использованием элементов структурных схем и обобщенного компонента статической характеристики.

Корректность вычислительных моделей компонентов продемонстрирована на примерах расчета переходных процессов в электромеханических системах с двигателем постоянного тока и асинхронным двигателем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация функционального проектирования электромеханических систем и устройств преобразовательной техники // В.М. Дмитриев, Т.Н. Зайченко, А.Г. Гарганеев, Ю.А. Шурыгин. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. – 292 с.
2. Арайс Е.А., Дмитриев В.М. Моделирование неоднородных цепей и систем на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1982. – 160 с.
3. Дмитриев В.М., Шутенков А.В., Ганджа Т.В. Архитектура универсального вычислительного ядра для реализации виртуальных лабораторий // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 2. – С. 24–28.
4. Арайс Е.А., Дмитриев В.М. Автоматизация моделирования многосвязных механических систем. – М.: Машиностроение, 1987. – 240 с.
5. Дмитриев В.М., Арайс Л.А., Шутенков А.В. Автоматизация моделирования промышленных роботов. – М.: Машиностроение, 1995. – 304 с.
6. Зайченко Т.Н. Автоматизация моделирования линейных непрерывных САУ в системе МАРС // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 9. – С. 1–7.
7. Дьяконов В.П. Simulink 4. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.
8. Зайченко Т.Н. Автоматизация схемотехнического моделирования электрических машин в системе МАРС // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 11. – С. 1–9.
9. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
10. Чучалин А.И. Математическое моделирование в электромеханике. – Томск: Изд-во ТПУ, 1997. – 170 с.
11. Ананин В.Г., Зайченко Т.Н. Автоматизация функционального моделирования строительных и дорожных машин (СДМ) // Вестник ТГАСУ. – 2000. – № 1. – С. 275–290.
12. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.